

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ВИБРОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ

Г. В. СУРКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр гироскопических приборов
и устройств и механики)

Процесс вибротранспортирования

Вибротранспортирование осуществляется на специальных установках (виброконвейерах), рабочий орган которых (лоток) совершает периодические колебания высокой частоты при относительно небольшой амплитуде.

Рассмотрим взаимодействие лотка 1 (рис. 1) с единичным предметом, который представляется в виде не упругой материальной точки. Лоток движется во времени t по закону $A(1 - \cos \omega t)$ под углом вибрации β . Рабочая поверхность лотка установлена под углом α к горизонту. Коэффициент трения предмета о лоток $f = \operatorname{tg} \rho$. Лоток движется с ускорением a , которое сообщается предмету в процессе их совместного движения. Сила тяжести предмета G и сила инерции P дают равнодействующую R . Направление равнодействующей по отношению к нормали определяется углом ψ , из рис. 1 имеем:

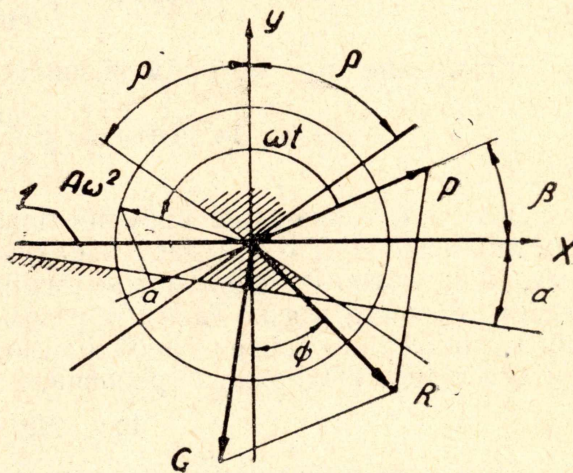


Рис. 1. Схема взаимодействия предмета с лотком.

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{-A\omega^2 \cos \omega t - g \sin \alpha}{A\omega^2 \sin \omega t + g \cos \alpha}.$$

Делим на $\operatorname{tg} \rho$, после преобразования получим:

$$\varepsilon = \frac{\operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \rho} = - \frac{\gamma + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta}{(\gamma + 1) \operatorname{tg} \rho \operatorname{tg} \beta}. \quad (1)$$

Здесь

$$\gamma = \Gamma \cos \omega t, \quad \Gamma = \frac{A\omega^2 \sin \beta}{g \cos \alpha} [1]. \quad (2)$$

Уравнение (1) характеризует поведение предмета на лотке, то есть определяет режим вибротранспортирования. Так, при $|\varepsilon| \geq 1$

будет скольжение предмета относительно лотка. Условие скольжения вперед

$$\varepsilon \geq 1. \quad (3)$$

Скольжение назад $|\varepsilon| \geq 1$. Условие отрыва предмета от лотка

$$\varepsilon = \infty. \quad (4)$$

Из уравнения (1) условие (4) выполнимо, если $\operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \rho \neq 0$, только когда $\gamma = -1$. Знак минус указывает, что отрыв предмета возможен только при отрицательном направлении ускорения, то есть замедленном движении лотка вперед. На основании того, что в уравнении (1) условие (3) выполняется перед условием (4), можно сделать заключение: невозможен режим вибротранспортирования с подбрасыванием без предварительного скольжения вперед.

Возникновение скольжения вперед из (1), (3) при величине

$$\left. \begin{aligned} -\gamma_{(-)} &\geq \frac{\operatorname{tg} \rho + \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{tg} \rho} \\ \gamma_{(+)} &\geq \frac{\operatorname{tg} \rho - \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{ctg} \beta - \operatorname{tg} \alpha} \end{aligned} \right\} \quad \text{аналогично, скольжение назад будет, когда} \quad (5)$$

Ускорение, при котором возникает скольжение предмета по лотку вперед из (2) и (5) равно

$$a_{(-)} = A\omega^2 \cos \omega t'_c = g \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos(\beta - \rho)}.$$

Ускорение, при котором возникает скольжение назад,

$$a_{(+)} = A\omega^2 \cos \omega t''_c = g \frac{\sin(\rho - \alpha)}{\cos(\beta + \rho)}.$$

Здесь t'_c и t''_c — значения времени начала скольжения вперед и назад. Соотношение $a_{(-)} = a_{(+)}$ дает предельное значение параметров вибрации, при которых невозможно направленное перемещение, из (6) имеем $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg}^2 \rho \operatorname{tg} \beta$. Таким образом, для существования направленного движения вперед необходимо, наряду с известным условием $\operatorname{tg} \alpha < \operatorname{tg} \rho$, выдержать требование

$$\operatorname{tg} \alpha < \operatorname{tg}^2 \rho \operatorname{tg} \beta.$$

Для угла вибрации $\beta = 0^\circ$ отношение

$$\frac{a_{(-)}}{a_{(+)}} = \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\sin(\rho - \alpha)},$$

откуда следует $a_{(-)} > a_{(+)}$, то есть при симметричном законе колебаний и $\beta = 0^\circ$ возможно движение только под уклон. Если еще $\alpha = 0^\circ$, то $a_{(-)} = a_{(+)}$, что означает отсутствие возможности направленного движения. Чтобы создать перемещение предмета по лотку, в данном случае, последнему необходимо сообщить несимметричный закон колебаний; получим так называемый качающийся конвейер.

На рис. 2 дана диаграмма режимов процесса вибротранспортирования, которая получена в результате решения уравнения (1) с $\alpha = 0^\circ$. Характер относительного движения предмета по лотку на рис. 2 указан областями: I — область совместного движения вперед; II — совместного движения назад; III — скольжение вперед, IV — скольжение назад; V — область движения с отрывом. Из диаграммы ясно, что

при симметричном законе колебаний транспортирование возникает при наличии трения только в случае, когда угол вибрации не равен нулю. Скольжение вперед (область III), при любом значении угла вибрации, не равно нулю, начинается раньше, чем скольжение назад. Невозможно получить режим с подбрасыванием без скольжения вперед.

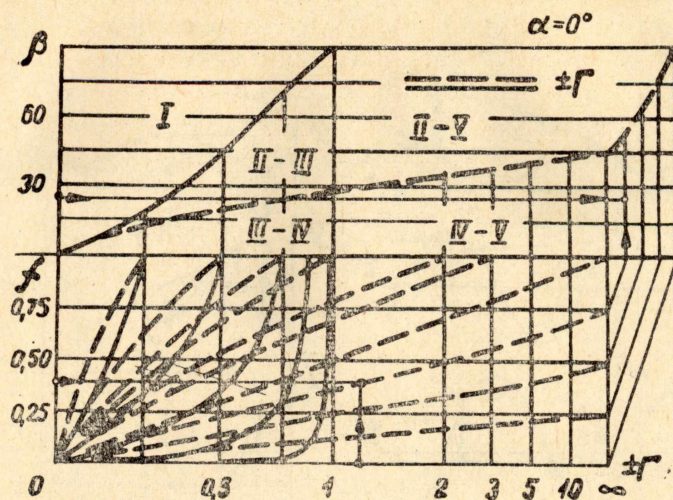


Рис. 2. Диаграмма режимов вибротранспортирования.

Вибротранспортирование в режиме с подбрасыванием характерно тем, что в процессе перемещения предмет значительное время находится во взвешенном состоянии, благодаря чему возможно получение больших скоростей подачи, снижается износ лотка, уменьшается влияние загружаемой массы груза на процесс колебаний.

Вибротранспортирование с подбрасыванием

1. Общие уравнения. Различное сочетание параметров вибрации и характеристик транспортируемого груза дают большое многообразие схем движения предмета [1, 2, 3]. Наиболее эффективным, с точки зрения производительности и уменьшения износа лотка, является такой режим, при котором существуют две фазы движения: совместное движение предмета и лотка, в течение которого происходит уравнивание скоростей, и отрывное движение (бросок). При этом чем меньше доля совместного движения во всем цикле, тем эффективнее режим. Проекция перемещения, скорости и ускорения лотка и предмета на неподвижную систему координат для двухфазного режима показаны на рис. 3.

Время начала скольжения предмета по лотку вперед из (6) равно

$$t'_c = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos(\beta - \rho)}.$$

На рис. 3 момент скольжения отмечен точкой t'_c . Скорость предмета и лотка в момент начала скольжения

$$\dot{x}(t'_c) = A\omega \sin \omega t'_c \cos \beta.$$

Скорость скольжения предмета относительно лотка до момента отрыва

$$\dot{x}(t'_c + t_0) = \dot{x}(t'_c) - S_{t'_c}^{t_0} \ddot{x}(t'_c + t_0) dt, \quad (7)$$

где $\ddot{x}(t_c \div t_0) = \frac{gF}{G}$ — замедление предмета на лотке от силы трения F .

Время и фазовый угол момента отрыва из (2)

$$t_0 = \frac{1}{\omega} \arccos\left(-\frac{1}{\Gamma}\right); \quad \varphi_0 = \arccos\left(-\frac{1}{\Gamma}\right). \quad (8)$$

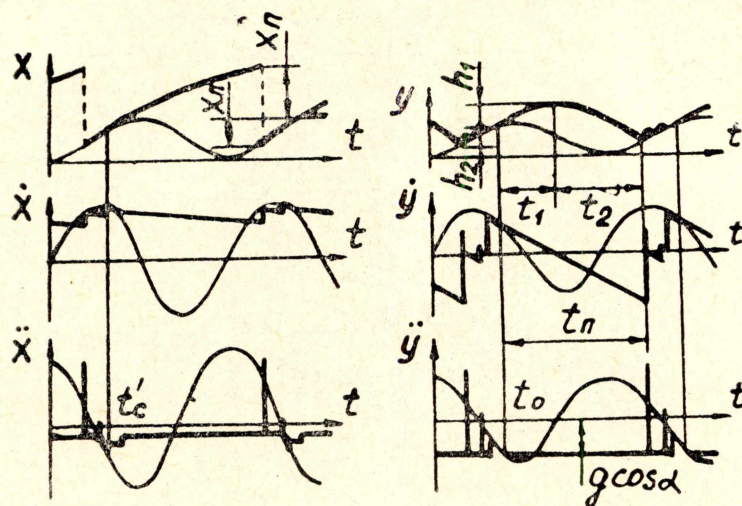


Рис. 3. Перемещение скорости и ускорения предмета и лотка.

В момент отрыва скорость лотка

$$\dot{x}_л(t_0) = A\omega \sin \omega t_0. \quad (9)$$

Из (7) и (9) видно, что разница в величине скорости скольжения предмета и скорости лотка в момент отрыва уменьшается с увеличением трения и параметра режима вибрации. Для оценки разницы скоростей скольжения и отрыва возьмем отношение

$$\frac{\dot{x}(t'_c)}{\dot{x}_л(t_0)} = \frac{\sin \omega t'_c}{\sin \omega t_0}.$$

Подставим значение t'_c и t_0 , после преобразования получим

$$\frac{\dot{x}(t'_c)}{\dot{x}_л(t_0)} = \sqrt{\frac{\Gamma^2 - \left[\frac{\sin \beta}{\cos \alpha} \cdot \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos(\beta - \rho)} \right]^2}{\Gamma^2 - 1}}.$$

Пусть, например, $A = 0,75$ мм, $\beta = 20^\circ$, $\alpha = 0^\circ$, $\omega = 314 \frac{1}{сек}$, $\rho = 23^\circ$,

тогда $\frac{\dot{x}(t'_c)}{\dot{x}_л(t_0)} = 1,07$, то есть разница в скоростях составляет 7%.

В действительности для данного случая относительная разница еще меньше, так как в примере не учтено снижение скорости скольжения к моменту отрыва за счет сил трения (7).

С момента отрыва предмет движется в среде по закону, описываемому уравнением свободного полета. Время полета равно времени подъема t_1 и опускания t_2 .

$$t_n = t_1 + t_2. \quad (10)$$

Время t_n определяется при допущении, что скорость отрыва предмета равна скорости лотка в момент отрыва, сопротивление полету отсутствует

$$t_1 = \frac{A\omega \sin t_0 \sin(\alpha + \beta)}{g}.$$

Время падения предмета $t_2 = \sqrt{\frac{2h}{g}}$, где высота падения (рис. 3)

$$h = h_1 + h_2 - x_n \sin \alpha.$$

Подставляя в (10) значения t_1 , t_2 и заменяя $\omega t_0 = \varphi_0$, $\omega t_n = \varphi_n$ — угол полета, после преобразования получим

$$0,5 \varphi_n = \varphi_n \sin \varphi_0 + [-\cos \varphi_0 + \cos(\varphi_0 + \varphi_n)]. \quad (11)$$

Если принять $\varphi_n = 2\pi n$, где n — доля времени полета во всей продолжительности 2π колебаний, то (11) после подстановки угла отрыва и ряда преобразований примет вид:

$$\Gamma = \sqrt{\left(\frac{2\pi^2 n^2 + \cos 2\pi n - 1}{2\pi n - \sin 2\pi n}\right)^2 + 1}. \quad (12)$$

Зависимость $\Gamma = f(n)$ уже известна в [4].

2. Скорость вибротранспортирования. Для установившегося двухфазного режима с подбрасыванием скорость транспортирования предмета в направлении лотка равна (рис. 3)

$$v = (x_n + x_l) \frac{\nu}{\kappa}, \quad (13)$$

где x_n — перемещение предмета по оси x за время полета,

x_l — то же за время совместного движения с лотком,

ν — частота колебаний лотка в 2π ,

κ — количество целых периодов колебаний лотка, в течение которых происходит один цикл движения.

При сделанных ранее допущениях

$$x_n = \frac{A\omega \sin \varphi_0 \cos(\alpha + \beta)}{\cos \alpha} t_n,$$

$$x_l = x_l(t_0) - x(t_n) = A [-\cos \varphi_0 + \cos(\varphi_0 + \varphi_n)] \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \alpha}.$$

Уравнение (13) после подстановки x_n и x_l , φ_n и Γ и преобразований с учетом (11) получит вид

$$v = \frac{gn^2 \cos(\alpha + \beta)}{2\kappa\nu \sin \beta}. \quad (14)$$

При $\alpha = 0^\circ$ выражение (14) превращается в формулу, ранее полученную другими авторами без учета угла подъема лотка [1].

Так как формула (14) выведена с рядом допущений, то действительная скорость вибротранспортирования определяется:

$$v = \eta \frac{gn^2 \cos(\alpha + \beta)}{2\kappa\nu \sin \beta}, \quad (14')$$

где η — экспериментальный поправочный коэффициент.

При анализе движения по рис. 3 видно, что есть область значений угла полета, когда возможно падение предмета на лоток в зо-

не $\ddot{y}_n(t_n) \leq g \cos \alpha$, то есть когда предмет отделяется от лотка прежде, чем он начнет двигаться со скоростью лотка. Из (2) и (4) имеем

$$\sqrt{\gamma} = \Gamma \cos(\alpha_0 + \alpha_n) \leq -1$$

Преобразование этого выражения с учетом (8) дает условие ненормального течения процесса вибротранспортирования

$$\gamma = -\sqrt{\Gamma^2 - 1} \sin \varphi_n + \cos \varphi_n \leq -1.$$

На рис. 4 дано решение данного уравнения. Установлено, что при изменении параметра Γ от 3,3 до 4,6; от 6,3 до 7,79 и других пределах Γ уравнение (14) неприемлемо для определения скорости.

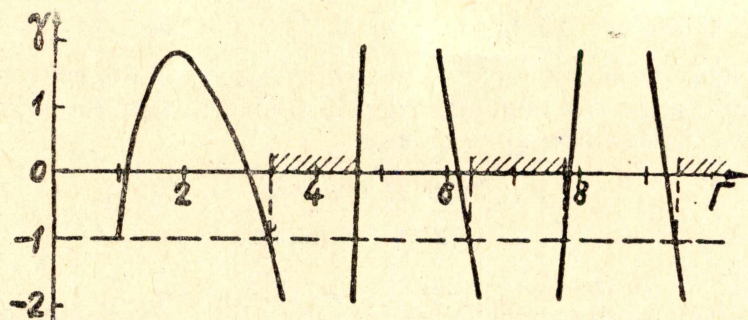


Рис. 4. Функция $\gamma = f(\Gamma)$.

Формула (14) выводится из предположения, что удар неупругий или, если происходит отскок предмета в процессе соударения, то величина его незначительна и скорость предмета сравнивается со скоростью лотка до момента отрыва. На рис. 3 этот процесс показан условно значительными колебаниями ускорения и скорости. В действительности же, особенно при транспортировании штучных предметов, упругость играет заметную роль и является причиной нарушения процесса при больших скоростях соударения [3].

Скорость соударения предмета с лотком

$$v_y = \dot{y}(t_n) - \dot{y}_n(t_n),$$

где $\dot{y}(t_n)$ — составляющая скорости предмета в момент удара,

$\dot{y}_n(t_n)$ — составляющая скорости лотка в тот же момент.

Уравнение для определения скорости соударения после подстановки составляющих и преобразований получит вид:

$$v_y = \frac{g \cos \alpha}{\omega} \{ [\sqrt{\Gamma^2 - 1} (1 - \cos \varphi_n) + \sin \varphi_n] - \varphi_n \}.$$

Предельные скорости соударения, при которых движение еще устойчиво, определяются экспериментальным путем.

Для оценки влияния коэффициента трения на вибротранспортирование определим угол соударения предмета с лотком через

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{v_x^0}{v_y},$$

где

$$v_x^0 = \dot{x}(\varphi_0) - \dot{x}_n(\varphi_0 + \varphi_n) = \operatorname{ctg} \beta \cos \frac{g}{\omega} [\sqrt{\Gamma^2 - 1} (1 - \cos \varphi_n) + \sin \varphi_n].$$

Величина угла соударения

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{ctg} \beta \frac{[\sqrt{\Gamma^2 - 1} (1 - \cos \varphi_n) + \sin \varphi_n]}{[\sqrt{\Gamma^2 - 1} (1 - \cos \varphi_n) + \sin \varphi_n] - \varphi_n}. \quad (15)$$

Из решения (15) определено, что угол соударения в режимах с параметром, близким к $\Gamma = 3,3; 6,3; 9,4; 12,6$, имеет малое значение. Режимы с $\Gamma = 3,3; 6,3$ и др. имеют угол соударения, равный нулю.

Известно, что при угле соударения, меньшем угла трения, не будет относительного движения между соударяемыми неупругими телами, поэтому можно сделать вывод, что имеются режимы вибротранспортирования с $\Gamma = 3,3; 6,3$ и др., где скорость теоретически не зависит от коэффициента трения.

3. Оптимальные параметры вибрации. Из (14) ясно, что заданную скорость можно получить при различных сочетаниях параметров вибрации: амплитуды, частоты, углов α и β . Однако не все сочетания являются рациональными с точки зрения требований, предъявляемых к виброконвейеру и процессу.

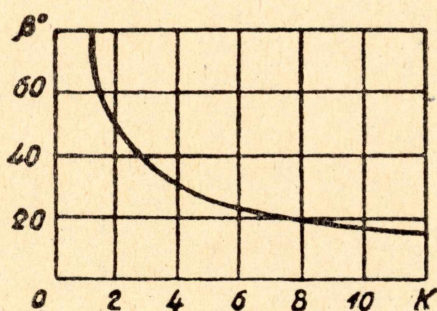


Рис. 5. Оптимальное значение угла вибрации.

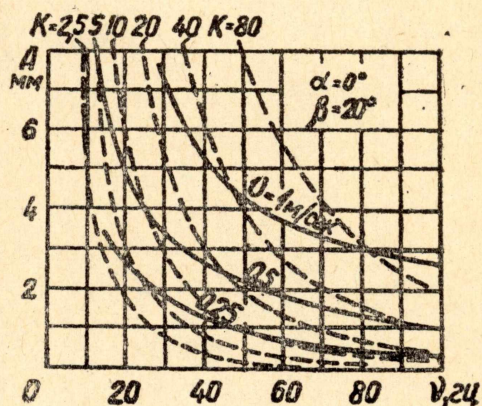


Рис. 6. Влияние амплитуды и частоты вибрации на скорость.

При вибротранспортировании могут быть поставлены условия минимального нарушения поверхности лотка или самих предметов, возможность транспортирования при особых свойствах груза. При эксплуатации предъявляются требования к спектру частот вибрации, шумности работы, пылеобразованию, энергоемкости. Особым условием к конструкции может быть требование повышенной надежности, долговечности работы, что можно достигнуть при прочих равных показателях, только снижением коэффициента динамики виброконвейера $K = \frac{A\omega^2}{g}$ [1]. Часто перед конвейером ставят комбинированные требования.

При оценке эффективности вибротранспортирования можно исходить из условия минимума коэффициента динамики, как наиболее общего показателя, определяющего сохранность груза и напряженность упругой системы конвейера.

Из (14) можно заключить, что увеличение угла подъема лотка, при прочих равных условиях, вызывает снижение скорости, поэтому необходимо стремиться по возможности к уменьшению угла подъема лотка до минимума.

Зависимость оптимального угла вибрации от коэффициента динамики показана на рис. 5, график получен обработкой формулы (14) при $\alpha = 0^\circ$.

На рис. 6 дано решение уравнения (14) в координатах амплитуда—частота. Из диаграммы видно, что низкочастотные виброконвейеры при меньшем значении коэффициента динамики могут дать наибольшие скорости подачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Ф. Гончаревич, П. А. Сергеев. Вибрационные машины в строительстве. Машгиз, М., 1963.
 2. И. И. Блехман. Исследование процесса вибросепарации и вибротранспортировки. Инженерный сборник АН СССР, т. 2, 1952.
 3. В. А. Повидайло. Расчет и конструирование вибрационных питателей. Машгиз, М., 1962.
 4. K. H. Wehmeier. Untersuchungen zum Fördervorgang auf Schwingrinnen. Fordern und Heben, № 5, p. 317—327, 1961.
-